الوحدة الثانية

مقدمة فى الفيزياء الحديثة

الفصل 5 ازدواجية الموجة والجسيم.

الفصل 5 ازدواجية الموجة والجسيم

* يتدرج كل ما درسناه فى الفصول السابقة تحت ما يسمى الفيزياء الكلاسيكية، وهى الفيزياء التى تفسر المشاهدات اليومية والتجارب المعتادة.

* هناك فرع آخر للفيزياء يطلق عليه فيزياء الكم، ويتعامل هذا الفرع مع :

- الظواهر العلمية التى قد لا نراها فى حياتنا اليومية بصورة مباشرة.
- الظواهر الإلكترونية التى هى أساس نظم الإلكترونيات والاتصالات الحديثة.
- التفاعلات الكيميائية على مستوى الجزىء والتى تمكن العالم أحمد زويل من تصوير بعضها باستخدام كاميرا الليزر فائقة السرعة بما أهله للفوز بجائزة نوبل للكيمياء عام ١٩٩٩م
- العديد من آثار الكون التى لا تستطيع الفيزياء الكلاسيكية تفسيرها وخاصة عندما نتعامل على المستوى الذرى أو دون الذرى.

أحمد زويل

* مما سبق يمكن تعريف كل من الفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكم كالتالى :

الفيزياء الكلاسيكية

الفيزياء التى تمكننا من تفسير مشاهداتنا اليومية والتجارب العادية مثل دراستنا للموجات كالصوت والضوء والحرارة والكهرباء ودراسة خصائصها.

فيزياء الكم

الفيزياء التى تمكننا من دراسة وتفسير ظواهر لا نراها بصورة مباشرة خاصة عند التعامل على المستوى الذرى مثل دراسة الأطياف الذرية والظواهر الإلكترونية أو على مستوى الجزىء مثل دراسة التفاعلات الكيميائية.

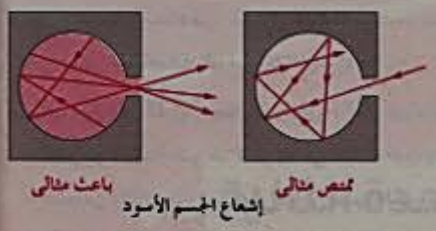
* سندرس فى هذا الفصل بعض الظواهر التى لم تتمكن الفيزياء الكلاسيكية من تفسيرها ولكن تم تفسيرها عن طريق فيزياء الكم، ومنها :

(١) إشعاع الجسم الأسود.

(٢) التأثير الكهروضوئى والانبعاث الحرارى.

(٣) ظاهرة كومتون.

أولاً إشعاع الجسم الأسود Black Body Radiation



* الجسم الأسود هو جسم غير موجود فى الطبيعة ولكن يمكن تشبيهه بتجويف مغلق به ثقب صغير وما بداخل هذا التجويف يبدو أسود وذلك لأن :
  - معظم الإشعاع يظل محصورًا بداخل التجويف من كثرة الانعكاسات.
  - الجزء الأكبر من الأشعة يمتص ولا يخرج منه إلا جزء صغير وهو ما يطلق عليه إشعاع الجسم الأسود.

الجسم الأسود

جسم يمتص كل ما يسقط عليه من أشعة ذات أطوال موجية مختلفة (ممتص مثالى) ثم يعيد إشعاعها مرة أخرى (باعث مثالى).

* يوجد أنواع مختلفة من الأشعة الكهرومغناطيسية التى تختلف فى التردد والطول الموجى كما بالشكل :

* نلاحظ من الشكل السابق أن الضوء نوع من أنواع الأشعة الكهرومغناطيسية لذلك يتمتع بالخصائص الآتية :

(١) الانعكاس والانكسار والتداخل والحيود. (٢) لا يحتاج وسط مادى لانتشاره.

(٣) ينتشر فى الفراغ بسرعة ثابتة قدرها 3×10^8 m/s

الأجسام المتوهجة والأجسام غير المتوهجة

* الأجسام التى تشع ضوء وحرارة تسمى أجسام متوهجة (أجسام ساخنة)، بينما الأجسام التى يكون غالبية الإشعاع الصادر منها إشعاع حرارى تسمى أجسام غير متوهجة مثل الأرض.

الأجسام المتوهجة

أجسام يصدر منها إشعاع ضوئى وإشعاع حرارى (مثل الشمس).

الأجسام غير المتوهجة

أجسام يكون غالبية الإشعاع الصادر منها إشعاع حرارى (مثل الأرض).

* أمثلة لأجسام متوهجة :

الشمس والنجوم

قطعة فحم متقدة

فتيلة مصباح

الضوء الصادر من كل مصدر من المصادر المتوهجة (الشمس، النجوم، قطعة الفحم المتقـدة، فتيلة المصباح...) لا يحتوى على جميع الأطوال الموجية بنفس القدر بل تختلف شدة الإشعاع مع الطول الموجى.

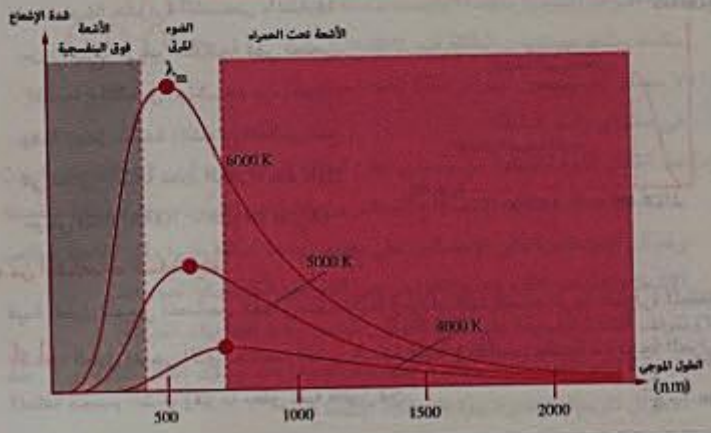
العلاقة بين شدة الإشعاع والطول الموجى (منحنى بلانك) Plank's Distribution

* قام العالم بلانك بتفسير العلاقة بين شدة الإشعاع والطول الموجى من خلال دراسة الإشعاعات الصادرة من مصادر مختلفة، ووضع منحنى بيانى يوضح هذه العلاقة يسمى منحنى بلانك.

بلانك

منحنى بلانك :

منحنى يوضح العلاقة البيانية بين شدة الإشعاع والطول الموجى للطيف المنبعث.



• **وصف منحنى بلانك :**

(١) عند الأطوال الموجية الطويلة والقصيرة جدًا تقترب شدة الإشعاع من الصفر.

(٢) عند قيمة معينة من الطول الموجى (λ_m) تصل شدة الإشعاع إلى قيمة عظمى.

(٣) عند ارتفاع درجة الحرارة تزداد الشدة الكلية للإشعاع (يرتفع مستوى المنحنى) ويقل الطول الموجى (λ_m) الذى يقابل أقصى شدة إشعاع.

(٤) يتكرر هذا المنحنى مع كل الأجسام الساخنة التى تشع طيفًا متصلًا للإشعاع.

فمثلًا :

- درجة حرارة سطح الشمس ($T = 6000\ K$) وهذا يجعل شدة الإشعاع العظمى (قمة المنحنى) تقع فى منطقة الضوء المرئى عند طول موجى ($\lambda_m = 0.5\ \mu m = 500\ nm$).

لذلك فإن حوالى 40% من الإشعاع الصادر من الشمس يقع فى منطقة الضوء المرئى، 50% فى منطقة الأشعة تحت الحمراء، والباقى يقع فى باقى مناطق الطيف.

- درجة حرارة مصباح متوهج ($T = 3000\ K$) وهذا يجعل شدة الإشعاع العظمى (قمة المنحنى) تقع فى نطاق الأشعة تحت الحمراء عند طول موجى ($\lambda_m = 1\ \mu m = 1000\ nm$) ولذلك فإن غالبية الإشعاع الصادر من المصباح (80%) إشعاع حرارى، 20% فقط ضوئى.

- درجة حرارة الأرض منخفضة كثيرًا عن درجة حرارة الشمس باعتبارها من الأجسام غير المتوهجة فهى تمتص إشعاع الشمس ثم تشعه مرة أخرى، وهذا يجعل شدة الإشعاع العظمى تقع فى نطاق الأشعة تحت الحمراء عند طول موجى ($\lambda_m \approx 10\ \mu m \approx 10000\ nm$)

• **من المشاهدات السابقة يتضح أن :**

قيمة الطول الموجى المصاحب لأقصى شدة إشعاع تزداد كلما نقصت درجة الحرارة المطلقة.

أى أن : الطول الموجى الذى تصاحبه أقصى شدة إشعاع يتناسب عكسيًا مع درجة الحرارة المطلقة للجسم المشع، وهو ما يطلق عليه قانون فين. $\lambda_m \propto \frac{1}{T}$

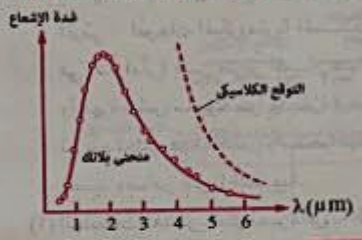
قانون ڤين

الطول الموجى المصاحب لأقصى شدة إشعاع (λ_m) يتناسب عكسيًا مع درجة الحرارة الكلفينية للمصدر المشع.

$$\frac{(\lambda_m)_1}{(\lambda_m)_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

• لم تتمكن الفيزياء الكلاسيكية من تفسير هذه المشاهدات لأنه من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية :

بما أن الإشعاع موجات كهرومغناطيسية فإن شدة الإشعاع تزداد كلما زاد التردد (نقص الطول الموجى) بينما وجد أن شدة الإشعاع تقل عند ترددات عالية (أطوال موجية قصيرة)، كما بالشكل المقابل.



تفسير بلانك (عام ١٩٠٠م) لإشعاع الجسم الأسود

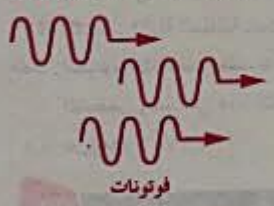
• استطاع بلانك أن يفسر ظاهرة إشعاع الجسم الأسود بفرض عدة فروض هى :

(١) الإشعاع يتكون من وحدات أو دفقات صغيرة من الطاقة تسمى كل منها كوانتم (كم) أو فوتون طاقته ($E = h\upsilon$)، حيث h ثابت بلانك، υ التردد.

(٢) تصدر الفوتونات نتيجة تذبذب ذرات الجسم المشع.

(٣) طاقة الذرات المتذبذبة منفصلة وليست متصلة وإنما مكماة وتأخذ مستويات الطاقة قيم $E = nh\upsilon$

(٤) لا يصدر إشعاع من الذرات طالما كانت مستقرة فى مستوى واحد للطاقة.



(٥) عند انتقال الذرة المتذبذبة من مستوى أعلى للطاقة إلى مستوى أدنى للطاقة يصدر فوتون طاقته $E = h\upsilon$، ويتألف الإشعاع الصادر من بلايين من الفوتونات، لا نلاحظها منفصلة رغم أن العين قادرة على الإحساس حتى بفوتون واحد ساقط عليها ولكن نلاحظ خواص الإشعاع الصادر ككل، وهذه الخواص هى الخواص الكلاسيكية للموجات.

(٦) تتوقف الشدة الضوئية على طاقة الفوتون الواحد وعدد الفوتونات المنبعثة.

(٧) بزيادة تردد الفوتونات تزداد طاقتها ويقل عددها عند ثبوت الطاقة الكلية أى أن عند الأطوال الموجية القصيرة جدًا تقل شدة الإشعاع.

أهمية دراسة الإشعاع الصادر من الأجسام المختلفة

تصوير سطح الأرض

(١) يمكن تصوير سطح الأرض باستخدام مناطق الطيف المختلفة (الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من سطح الأرض - الضوء المرئي - الموجات الميكرومترية المستخدمة في الرادار) عن طريق أقمار صناعية وأجهزة قياس محمولة جوًا وأجهزة أرضية، ثم يتم تحليل هذه الصور واستخدامها في تحديد مصادر الثروة الطبيعية.

صورة حرارية

(٢) التطبيقات العسكرية مثل أجهزة الرؤية الليلية لرؤية الأجسام المتحركة في الظلام واضحة بفعل ما تشعه من إشعاع حراري.

(٣) يستخدم التصوير الحراري في الطب وخاصة في مجال الأورام والأجنة.

(٤) اكتشاف الأدلة الجنائية حيث يبقى الإشعاع الحراري لشخص فترة بعد انصراف الشخص وتسمى هذه التقنية الاستشعار عن بُعد.

ثانيًا التأثير الكهروضوئي والانبعاث الحراري Photoelectric Effect and Heat Emission

* يحتوي أي معدن على أيونات موجبة وإلكترونات حرة تستطيع أن تتحرك داخل المعدن ولكنها لا تستطيع أن تغادره بسبب قوى التجاذب التي تجذبها دائمًا للداخل، وتسمى هذه القوى حاجز جهد السطح.

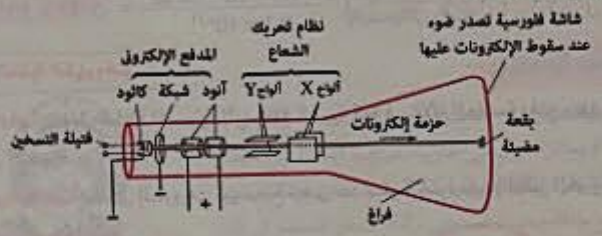
حاجز جهد السطح
قوى التجاذب التي تجذب الإلكترونات نحو الداخل وتمنع تحررها من سطح المعدن.

* إذا تم إعطاء هذه الإلكترونات طاقة حرارية أو ضوئية يمكن أن تخرج من المعدن بشرط أن تكون هذه الطاقة كافية للتغلب على حاجز جهد السطح وهذه هي فكرة عمل :

(١) أنبوبة شعاع الكاثود. (٢) الخلية الكهروضوئية.

١ أنبوبة شعاع الكاثود Cathode Ray Tube

- **الاستخدام :** شاشة التليفزيون والكمبيوتر.
- **الأساس العلمى :** انطلاق إلكترونات من سطح معدن عند تسخينه (التأثير الكهروحرارى).
- **التكوين وطريقة العمل :**



(١) تتكون الأنبوبة من سطح معدنى يسمى المهبط أو الكاثود.

(٢) يتم تسخين الكاثود بواسطة فتيلة تسخين فتنطلق بعض الإلكترونات من المدفع الإلكترونى بفعل الحرارة متغلبة على قوة الجذب عند السطح (حاجز جهد السطح).

(٣) تلتقط الشاشة المتصلة بقطب موجب يسمى المصعد أو الأنود هذه الإلكترونات مما يسبب تيارًا فى الدائرة الخارجية.

(٤) عندما تصطدم هذه الإلكترونات بالشاشة فإنها تصدر ضوءًا تختلف شدته من نقطة لأخرى حسب شدة الإشارة الكهربية المرسلة.

(٥) طاقة حركة الإلكترونات (KE) تتعين من العلاقة :

$$KE = \frac{1}{2} m_e v^2 = eV$$

الطاقة بوحدة الجول = الطاقة بوحدة الإلكترون فولت × شحنة الإلكترون

حيث : (m_e) كتلة الإلكترون ، (v) متوسط سرعة الإلكترون ، (e) شحنة الإلكترون ، (V) فرق الجهد بين الكاثود والأنود.

ملحوظة

- يمكن التحكم فى شدة الشعاع الإلكترونى بواسطة شبكة تعترض طريق الإلكترونات، كما يمكن استخدام مجالات كهربية ومغناطيسية لتوجيه مسار حزمة الإلكترونات لمسح الشاشة نقطة بنقطة حتى تكتمل الصورة.

مثال أنبوبة شعاع الكاثود تعمل على فرق جهد 10 kV أوجد سرعة الإلكترونات المنبعثة من الكاثود (علمًا بأن : $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C , $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg).

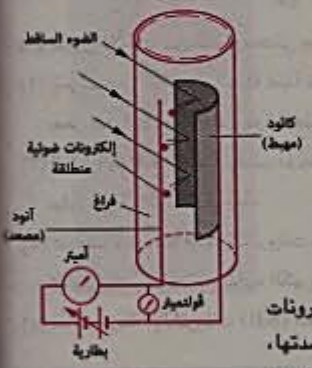
الحل

$V = 10^4$ V $v = ?$

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eV \quad , \quad v = \sqrt{\frac{2eV}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^4}{9.1 \times 10^{-31}}} = 5.93 \times 10^7 \text{ m/s}$$

٢ الخلية الكهروضوئية

* **الاستخدام :** تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربية كما في الآلة الحاسبة وفتح وغلق الأبواب وبعض الأجهزة.
* **الأساس العلمي :** انطلاق إلكترونات من سطح معدن عند سقوط ضوء عليه (التأثير الكهروضوئي).
* **التكوين وطريقة العمل :**



(١) تتكون الخلية الكهروضوئية من سطح معدني يسمى المهبط أو الكاثود.

(٢) عند سقوط ضوء على السطح المعدني تنطلق بعض الإلكترونات من هذا السطح.

(٣) يلتقط المصعد أو الأنود هذه الإلكترونات مما يسبب تيارًا في الدائرة الخارجية.

* **المشاهدة العملية :**

(١) يتوقف انطلاق الإلكترونات والتي تسمى الإلكترونات الكهروضوئية على تردد الموجة الساقطة وليس شدتها، إذ لا تنطلق هذه الإلكترونات إلا إذا كان تردد الضوء الساقط أعلى من أو يساوي قيمة معينة تسمى القيمة الحرجة υ_c مهما كانت الشدة.

(٢) إذا كان تردد الموجة الساقطة يساوي أو أكبر من υ_c فإن شدة التيار الكهروضوئي (عدد الإلكترونات) تزداد بزيادة شدة الضوء الساقط.

(٣) سرعة وطاقة حركة الإلكترونات المنطلقة تتوقف على تردد الضوء الساقط وليس شدته.

(٤) انطلاق الإلكترونات يحدث لحظيًا ولا تكون هناك فترة انتظار لتجميع الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترونات حتى إذا كانت شدة الإضاءة ضعيفة بشرط أن يكون تردد الضوء أكبر من التردد الحرج.

• **لم تتمكن النظرية الكلاسيكية من تفسير هذه المشاهدات، لأنه طبقًا للتصور الكلاسيكي :**

(١) يتوقف انطلاق الإلكترونات على شدة الموجة الساقطة بصرف النظر عن ترددها.

(٢) تزداد سرعة وطاقة حركة الإلكترونات المنطلقة مع زيادة شدة الإضاءة.

(٣) إذا كانت شدة الإضاءة قليلة، فإن تسليط الضوء لمدة طويلة كفيل بإعطاء الإلكترونات الطاقة اللازمة لتتحرر بصرف النظر عن تردد موجة الضوء الساقط.

وهو ما يتعارض مع التجارب العملية.

تفسير أينشتين

أينشتين

• تمكن أينشتين من تفسير هذه المشاهدات وفاز عام ١٩٢١م بجائزة نوبل في الفيزياء عن هذا التفسير، حيث فسر الظاهرة الكهروضوئية كالتالي : يلزم لنزع إلكترونات السطح طاقة محددة تسمى *دالة الشغل للسطح* (E_w) بحيث :

(١) إذا كانت طاقة الفوتون الساقط أقل من دالة الشغل للسطح لا تتحرر أي إلكترونات من السطح مهما زادت شدة الضوء الساقط أو مدة تعرض السطح للضوء الساقط.

(٢) إذا كانت طاقة الفوتون الساقط تساوي دالة الشغل للسطح فإن هذا الفوتون يستطيع بالكاد أن يحرر إلكترون من سطح المعدن دون إكسابه طاقة حركة، ويكون في هذه الحالة تردد الفوتون هو التردد الحرج υ_c

$$E_w = h\upsilon_c = \frac{hc}{\lambda_c}$$ (حيث (λ_c) الطول الموجي الحرج)

(٣) إذا كانت طاقة الفوتون الساقط أكبر من دالة الشغل لسطح المعدن فإن فرق الطاقة يظهر على شكل طاقة حركة يكتسبها الإلكترون المنبعث.

وبالتالي يمكن تعريف الظاهرة الكهروضوئية كالتالي :

الظاهرة الكهروضوئية :

ظاهرة انبعاث إلكترونات من سطح معدن عند سقوط ضوء ذو تردد مناسب عليه.

دالة الشغل لمعدن (E_w)

الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون من سطح المعدن دون إكسابه طاقة حركة.

التردد الحرج لسطح (υ_c)

أقل تردد للضوء الساقط يكفي لتحرير الإلكترون من سطح المعدن دون إكسابه طاقة حركة.

- **ما معنى قولنا أن:** دالة الشغل لمعدن الفارصين = 6.89×10^{-19} J

معنى ذلك أن الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون من سطح المعدن دون إكسابه طاقة حركة = 6.89×10^{-19} J

- **ما معنى قولنا أن:** التردد الحرج لسطح = 4.8×10^{14} Hz

معنى ذلك أن أقل تردد للضوء الساقط على هذا السطح يكفي لتحرير الإلكترون من سطح المعدن دون إكسابه طاقة حركة = 4.8×10^{14} Hz

العوامل التي تتوقف عليها دالة الشغل لسطح معدن

- نوع مادة السطح، ولا تتوقف على شدة الضوء أو زمن التعرض له أو فرق الجهد بين المصعد والمهبط.

العلاقة بين شدة التيار الكهروضوئي وشدة الإضاءة

- إذا كان تردد الفوتون (الضوء) الساقط أقل من التردد الحرج للسطح لا ينبعث تيار كهروضوئي مهما زادت شدة الإضاءة أو زمن سقوط الضوء.

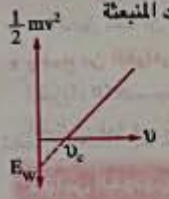
$\upsilon < \upsilon_c$

- إذا كان تردد الفوتون (الضوء) الساقط أكبر من التردد الحرج للسطح تزداد شدة التيار الكهروضوئي بزيادة شدة الإضاءة (زيادة عدد الفوتونات).

$\upsilon > \upsilon_c$

العلاقة بين طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة من سطح الفلز وتردد الضوء الساقط

∵ طاقة الفوتون الساقط = دالة الشغل للسطح + طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة



$$\therefore \boxed{E = E_w + KE}$$

$$\therefore \boxed{h\upsilon = h\upsilon_c + \frac{1}{2}mv^2}$$

وهى معادلة أينشتين للظاهرة الكهروضوئية.

ملحوظة

• الإلكترون الأكثر ارتباطًا يحتاج إلى طاقة أكبر بكثير من دالة الشغل لتحرره بعكس إلكترون السطح الذى يحتاج طاقة تساوى دالة الشغل ليتحرر.

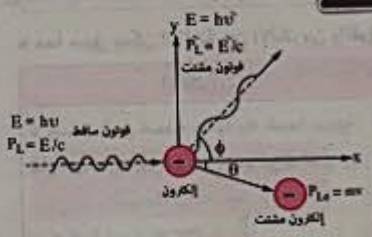
مثال احسب دالة الشغل لفلز الطول الموجى الحرج له 2700 Å

الحل

$\lambda_c = 2700\ \text{Å}$ | $h = 6.625 \times 10^{-34}\ J.s$ | $c = 3 \times 10^8\ m/s$ | $E_w = ?$

$$E_w = \frac{hc}{\lambda_c} = \frac{6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{2700 \times 10^{-10}} = 7.36 \times 10^{-19}\ J$$

ثالثًا ظاهرة كومتون Compton Effect



• عند سقوط فوتون (من أشعة إكس أو جاما) على إلكترون حر :

– يقل تردد الفوتون ويغير اتجاهه.

– تزداد سرعة الإلكترون ويغير اتجاهه.

• وتسمى هذه الظاهرة «بظاهرة كومتون»

• لم تتمكن النظرية الكلاسيكية من تفسير ذلك ولكن تم تفسيرها من خلال فرض بلانك بأن الشعاع الكهرومغناطيسى مكون من فوتونات، وهذه الفوتونات يمكن أن تصطدم بالإلكترونات تصادم مرن حيث يكون :

– مجمـوع كميتى حركة الفوتون والإلكترون قبل التصـادم = مجموع كميتى حركة الفوتون والإلكترون بعد التصادم (قانون بقاء كمية الحركة).

- مجموع طاقتى الفوتون والإلكترون قبل التصادم = مجموع طاقتى الفوتون والإلكترون بعد التصادم (قانون بقاء الطاقة).

* مما سبق نجد أن الفوتون يسلك كجسيم له كتلة وسرعة (كمية حركة) مثل الإلكترون.

* **يتضح من الظواهر السابقة أن :**

الفيزياء الكلاسيكية لم تتمكن من تفسيرها ولم يتم تفسيرها إلا من خلال فرض وجود الفوتون، فما هى خواص الفوتون ؟

خواص الفوتون

(١) كم من الطاقة $h\upsilon$ تتوقف قيمتها على التردد υ.

(٢) له كتلة m أثناء حركته، وكمية حركة P_L ويتحرك بسرعة الضوء فى الفراغ c

(٣) عندما يتوقف الفوتون عن الحركة تتحول كتلته بالكامل إلى طاقة يكتسبها الجسم الذى أوقف حركته.

(٤) له خاصية جسيمية وخاصية موجية لذا يتحقق فيه قانونى بقاء الكتلة والطاقة.

ملحوظة

* يرتبط تحول الكتلة m إلى طاقة E بعلاقة أينشتين $E = mc^2$ وهو أساس عمل القنبلة الذرية، حيث وجد أن انشطار النواة يصحبه فقد كتلة صغيرة جدًا تتحول إلى طاقة كبيرة جدًا وذلك لأن مربع سرعة الضوء كمية كبيرة ($c^2 = 9 \times 10^{16}\ m^2/s^2$).

القنبلة الذرية

* مما سبق يمكن المقارنة بين الإلكترون والفوتون كالتالى :

الإلكترون	الفوتون
* جسيم مادى شحنته سالبة وله طبيعة موجية.	* كمّ من الطاقة ($h\upsilon$) غير مشحون وله طبيعة جسيمية.
* يمكن تعجيله (زيادة سرعته) بالمجال الكهربى.	* لا يمكن تعجيله وسرعته ثابتة فى الفراغ (3×10^8 m/s).
* له كمية تحرك = $mv = \frac{h}{\lambda}$	* له كمية تحرك = $mc = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\upsilon}{c}$
* إذا توقف عن الحركة يحتفظ بكتلة سكونه ويفقد طاقة حركته.	* إذا توقف عن الحركة تتلاشى كتلته وتتحول إلى طاقة ($E = mc^2$).
* له كتلة سكون ثابتة ($m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg).	* له كتلة أثناء حركته فقط $\left(m = \frac{h\upsilon}{c^2}\right)$.

استنتاج القوة الناتجة عن سقوط شعاع من الفوتونات على سطح

* عند سقوط شعاع ضوئى تردده υ على سطح ما ثم إنعكاسه فإن :
  - كمية حركة الفوتون الساقط = mc
  - كمية حركة الفوتون المنعكس = $-mc$
  - التغير فى كمية حركة الفوتون نتيجة إنعكاسه = $2\,mc = \frac{2h\upsilon}{c}$
* إذا كان معدل سقوط الفوتونات على السطح ϕ_L فإن كل فوتون يسقط على السطح وينعكس عنه يعانى تغير فى كمية الحركة، حيث :

معدل التغير فى كمية حركة شعاع الفوتونات = $2\,mc\phi_L = 2\,\frac{h\upsilon}{c}\,\phi_L$

ويساوى القوة المؤثرة من شعاع الفوتونات على السطح.

$$\therefore F = 2\,\frac{h\upsilon}{c}\,\phi_L$$

$$\because P_w = h\upsilon\phi_L$$

حيث : P_w القدرة الضوئية الساقطة على السطح.

$$\therefore \boxed{F = 2\,\frac{P_w}{c}}$$

مثال احسب القوة التى يؤثر بها شعاع قدرته 1 W على سطح حائط.

الحل

$\boxed{P_w = 1\ W}$ $\boxed{c = 3 \times 10^8\ m/s}$ $\boxed{F = ?}$

$$F = \frac{2P_w}{c} = \frac{2 \times 1}{3 \times 10^8} = 0.67 \times 10^{-8}\ N$$

* هذه القوة صغيرة جدًا فلا يظهر تأثيرها على سطح الحائط ولكن يظهر تأثيرها على إلكترون حر لصغر كتلته، فتقذفه بعيدًا.

النموذج الماكروسكوبى والميكروسكوبى للتعامل مع الفوتون

* عند سقوط فوتونات على سطح ما، فإذا كان :

الطول الموجى للفوتونات (λ) أكبر بكثير من المسافات البينية	الطول الموجى للفوتونات (λ) مقارب للمسافات البينية
فإن	
- الفوتونات تعامل هذا السطح كسطح متصل وتنعكس عنه.	- الفوتونات تنفذ من خلال الذرات، وهذا ما يحدث فى حالة أشعة X
- يتم تطبيق النموذج الموجى للضوء (الماكروسكوبى).	- يتم تطبيق النموذج الجسيمى للضوء (الميكروسكوبى).

* من هنا يمكن التفريق بين النموذج الماكروسكوبى والنموذج الميكروسكوبى للضوء كالتالى :

النموذج الموجى للضوء (الماكروسكوبى)	النموذج الجسيمى للضوء (الميكروسكوبى)
* يُطبق إذا اعترض عائق أبعاده أكبر بكثير من الطول الموجى للموجة طريق فوتونات الضوء.	* يُطبق إذا اعترض عائق فى حجم الذرة أو الإلكترون طريق فوتونات الضوء.
* يدرس الفوتونات كحزمة بما لها من مجال مغناطيسى وكهربى متعامدان على بعضهما وعلى اتجاه سريان حزمة الفوتونات.	* يدرس الفوتون منفردًا ويتصوره كرة نصف قطرها يساوى الطول الموجى للموجة (λ) وتتذبذب بمعدل (υ).

الطبيعة الموجية للجسيم

* أثبت دى برولى أنه مثلما للموجات طبيعة جسيمية، فإن للجسيم طبيعة موجية، حيث يصاحب الجسيم موجة طولها الموجى يمكن استنتاجه كالتالى :

معادلة دى برولى للجسيمات

الطول الموجى لموجة مصاحبة لجسيم متحرك يساوى النسبة بين ثابت بلانك وكمية حركة الجسيم.

$$\because \lambda = \frac{c}{\upsilon}$$

$$\therefore \lambda = \frac{hc}{h\upsilon} = \frac{h}{h\upsilon/c}$$

$$\because P_L = mc = \frac{h\upsilon}{c^2}c = \frac{h\upsilon}{c}$$

بضرب البسط والمقام فى ثابت بلانك (h) :

$$\therefore \boxed{\lambda = \frac{h}{P_L}}$$

* وبالتالى فإننا ننظر إلى الطبيعة الموجية لكل من الضوء والإلكترونات كالتالى :

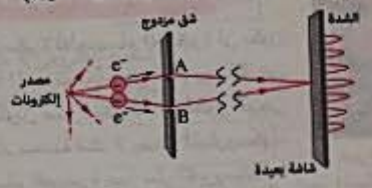
الطبيعة الموجية للضوء

- الضوء هو مجموعة هائلة من الفوتونات لها موجة مصاحبة تصف سلوكها الجماعى من انتشار وانعكاس وانكسار وتداخل وحيود.
- الفوتون بمفرده يحمل الصفات الوراثية للموجة (نفس خصائص مجموعة الفوتونات) من حيث التردد والسرعة والطول الموجى.

الطبيعة الموجية للإلكترونات

- شعاع الإلكترونات هو مجموعة هائلة من الإلكترونات لها موجة مصاحبة تصف سلوكها الجماعى.
- الإلكترون بمفرده يحمل الصفات الوراثية للكل (نفس خصائص مجموعة الإلكترونات) من حيث الكتلة والشحنة والدوران حول نفسه (اللف المغزلى) وكمية الحركة.
- يكون للموجة المصاحبة لحركة الإلكترون تردد وسرعة وطول موجى وخصائص الانتشار والانعكاس والانكسار والتداخل والحيود.

• والشكل التالى يوضح الطبيعة الموجية للإلكترون (خاصية الحيود) :



حيود الإلكترونات فى شق مزدوج

مثال

احسب الطول الموجى للموجة المصاحبة لحركة كرة كتلتها 140 kg تتحرك بسرعة 40 m/s ، ثم احسب الطول الموجى للموجة المصاحبة لحركة إلكترون إذا كان يتحرك بنفس السرعة.

الحل

$m = 140\ kg$ | $v = 40\ m/s$ | $h = 6.625 \times 10^{-34}\ J.s$

$m_e = 9.1 \times 10^{-31}\ kg$ | $\lambda = ?$ | $\lambda_e = ?$

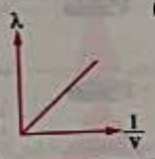
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.625 \times 10^{-34}}{140 \times 40} = 1.18 \times 10^{-37}\ m$$

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v} = \frac{6.625 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 40} = 1.82 \times 10^{-5}\ m$$

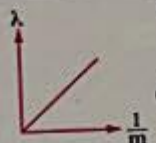
العوامل التى يتوقف عليها الطول الموجى المصاحب لجسيم متحرك

$$\lambda = \frac{h}{P_L} = \frac{h}{mv}$$

(١) سرعة الجسيم (v)
«علاقة عكسية»
الميل = $\lambda v = \frac{h}{m}$



(٢) كتلة الجسيم (m)
«علاقة عكسية»
الميل = $\lambda m = \frac{h}{v}$



• مما سبق يتضح أنه يمكن استخدام شعاع من الإلكترونات كما يستخدم شعاع الضوء، وهذا هو أساس عمل الميكروسكوب الإلكترونى.

المجهر (الميكروسكوب) الإلكتروني

صورة للفيروسات باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني

- يلزم لتكوين صورة مكبرة للأجسام الصغيرة أن يكون الطول الموجي للموجة المستخدمة في التصوير أقل من أبعاد الجسم المراد تكوين صورة مكبرة له، والطول الموجي للضوء العادي له أبعاد محددة لذلك لا يصلح الميكروسكوب الضوئي لرؤية الأجسام الصغيرة جدًا مثل الفيروسات.

- **فكرة عمل الميكروسكوب الإلكتروني :**

– تعجيل حزمة من الإلكترونات المتحررة تحت فرق جهد عالٍ (V) وتحسب سرعة الإلكترون المتحرر من العلاقة :

$$KE = \frac{1}{2} m_e v^2 = eV$$

– ويمكن حساب الطول الموجي للموجة المصاحبة لحركة الإلكترون من معادلة دي برولي :

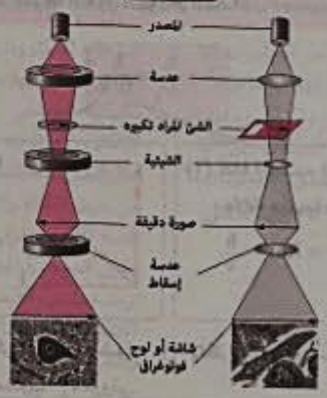
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

أي أنه بزيادة سرعة الإلكترون (v) يقل الطول الموجي (λ) للموجة المصاحبة للإلكترون حتى يصبح أقل من أبعاد الجسم وبذلك يمكن تكوين صورة مكبرة له.

وبالتالي فإن المجهر الإلكتروني يعتبر من الأجهزة المعملية التي تعتمد على الطبيعة الموجية للإلكترونات.

- **يتشابه الميكروسكوب الضوئي مع الميكروسكوب الإلكتروني في نواح عديدة، كالتالي :**

الميكروسكوب الضوئي	التركيب	الميكروسكوب الإلكتروني



الشعاع المستخدم	
- شعاع ضوئي.	- شعاع إلكتروني له طول موجي أقصر حوالى ألف مرة من الطول الموجي للشعاع الضوئي.
العدسات المستخدمة	
- عدسات ضوئية (زجاجية) تعمل على تركيز الضوء على الجسم المراد تكبيره.	- عدسات إلكترونية (مغناطيسية) تعمل على تركيز شعاع الإلكترونات على الجسم المراد تكبيره.
القدرة التحليلية	
- صغيرة.	- كبيرة جدًا، لأن الإلكترونات بإمكانها أن تحمل طاقة حركة عالية جدًا ومن ثم أطوال موجية قصيرة جدًا وبالتالى تستطيع أن ترصد أجسام صغيرة لا يستطيع الضوء العادى أن يرصدها.
معامل التكبير	
- محدود وبذلك لا يستطيع أن يميز التفاصيل الدقيقة.	- كبير جدًا وبذلك يكون له القدرة على تمييز التفاصيل الدقيقة.

مثال

إذا استخدم فرق جهد 400 V بين الأنود والكاثود لميكروسكوب إلكتروني،

(أ) احسب :

١- طاقة حركة الإلكترون.

٢- سرعة الإلكترون.

٣- الطول الموجي للموجة المصاحبة لحركة الإلكترون.

(ب) هل يمكن رؤية فيروس طوله 5 Å ؟ ولماذا ؟

الحل

$V = 400\ V$ | $h = 6.625 \times 10^{-34}\ J.s$ | $e = 1.6 \times 10^{-19}\ C$

$m_e = 9.1 \times 10^{-31}\ kg$ | $KE = ?$ | $v = ?$ | $\lambda = ?$

(1) -١

$KE = eV = 1.6 \times 10^{-19} \times 400 = 6.4 \times 10^{-17}\ J$

-٢

$KE = \frac{1}{2} mv^2$

$6.4 \times 10^{-17} = \frac{1}{2} \times 9.1 \times 10^{-31} v^2$

$v^2 = 1.41 \times 10^{14}\ (m/s)^2$

$v = 1.186 \times 10^7\ m/s$

-٣

$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.625 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 1.186 \times 10^7} = 6.138 \times 10^{-11}\ m$

(ب) يمكن رؤية الفيروس لأن الطول الموجى للموجة المصاحبة لحركة الإلكترون أقل من أبعاد الفيروس.